

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, SEPTIEMBRE DE 2012**

**ESTUDIO DE UNA OBRA DE DESVÍO MEDIANTE
MODELACIÓN MATEMÁTICA**

Sergio Oscar Liscia¹, Mauricio Abel Angulo¹, Adriana Ruiz Diaz², María Victoria Lugo¹

1 Laboratorio de Hidromecánica – Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina

2 Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

soliscia@ing.unlp.edu.ar, mauricio.angulo@ing.unlp.edu.ar, adrirc.82@gmail.com, lugomariavictoria@gmail.com

RESUMEN: La modelación numérica aplicada al estudio y diseño de obras hidráulicas tiene un enorme potencial no solo para estudiar aquellas que permanecerán en el tiempo sino también en las que permanecerán de forma temporaria pero que no por ello son menos importantes en el conjunto de la obra. Un buen ejemplo de ello es el estudio del diseño de las obras temporarias que conforman el desvío del río con la finalidad de abrir paso a la construcción de un aprovechamiento hidroeléctrico. Un planeamiento adecuado de las fases de construcción del desvío y el diseño correcto de todos los componentes permitirá comenzar la construcción de las obras principales, en el plazo y presupuesto estimados.

Este trabajo pretende mostrar la potencia de la herramienta numérica para evaluar y diseñar este tipo de obras en una etapa del proyecto donde la construcción de modelos físicos en escala reducida aún resulta costosa, en tiempo y recursos materiales.

El caso de estudio es la construcción de las obras temporarias que conformaran el recinto de construcción de la futura central hidroeléctrica sobre el vertedero existente del Brazo Aña Cuá sobre el río Paraná.

Los resultados de la modelación presentadas apuntan a definir, por un lado, la geometría de la atagüa de avance que mejores condiciones de flujo otorga en la zona de montaje de las atagüas celulares y, por el otro, la combinación de apertura de compuertas del vertedero que no perjudique la construcción y ni la estabilidad de las obras temporarias.

ABSTRACT:

Numerical modeling offers a great potential when applied not only to the study and design of definitive hydraulic works but also of those of temporary character that however are no less important from that. A good example is provided by the study of the design of temporary works involved in river diversion. The appropriate planning of the different stages of construction as well as the correct layout of the structures involved will allow for the proper construction of the main works in the estimated time and according to the budgeted amount.

The present work is intended to show how powerful these numerical tools are at evaluating and designing this type of works at the project stage, where the use of scale-reduced physical models is still costly in terms of time and material resources.

The study case concerns the building of the temporary works that will enclose the location of the future power plant on the existing spillway on the Paraná's river branch, Aña Cuá.

Modeling results showed are aimed at defining, on the one hand, the geometry of the forward cofferdam that provides the optimum downstream conditions where cellular cofferdams are going to be built and, on the other hand, the combination of the spillway sluice opening that compromises neither the construction nor the stability of the temporary works.

PALABRAS CLAVES: Modelación matemática, desvío del río.

INTRODUCCIÓN

La obra de desvío del río es una de las etapas más críticas en la construcción de aprovechamientos hidroeléctricos, y tiene una alta incidencia en el costo total de la obra (20 % en promedio) y puede ser aún mayor si implica el retraso o la interrupción temporal de la obra.

Dependiendo principalmente de la topografía, de las características geológicas del emplazamiento y de la magnitud de los caudales a derivar existen diferentes tipologías de desvío. Cualquiera sea el caso, el estudio en modelo físico a escala reducida resulta de gran importancia en etapas avanzadas del proyecto. No obstante, el proceso de diseño, construcción y ejecución de un modelo físico de esta magnitud requiere de tiempo y recursos considerables así como también de instalaciones de ensayo que puedan aportar los caudales requeridos en los ensayos y el espacio suficiente para poder representar toda la extensión de la obra. Esto resulta aún más crítico en grandes ríos donde los caudales derivados son elevados y la extensión del tramo a modelar es importante.

En el trabajo que se presenta a continuación se aplica la modelación matemática del desvío del caudal erogado por el vertedero del brazo Aña Cuá¹ para permitir la construcción de una central hidroeléctrica hidro-combinada fundada sobre el cuenco disipador del propio vertedero existente.

En la Figura 1, se presenta una planta del vertedero existente junto con una alternativa de las obras temporarias de desvío. Estas permiten crear un recinto estanco dentro de la pileta de aquietamiento del mismo, donde se instalarán las 5 unidades de generación. Cada unidad ocupará un vano de vertedero y tendrán la capacidad de dejar pasar crecidas sobre las unidades bulbo, sin afectar la capacidad actual del complejo Yacyretá.

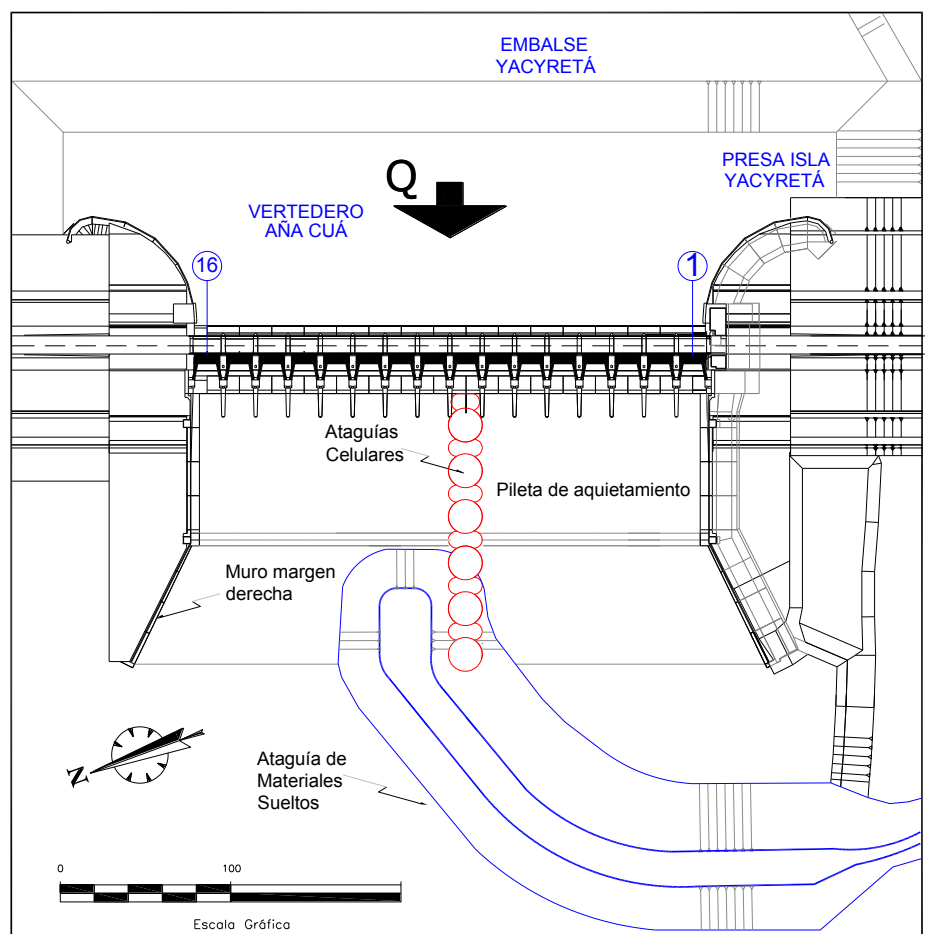


Figura 1.- Planta del vertedero sobre el Brazo Aña Cuá y recinto de construcción.

¹ Brazo secundario del río Paraná, aguas abajo de la represa de Yacyretá, ubicado sobre el territorio la República de Paraguay

MODELO NUMÉRICO

La modelación matemática se realizó mediante el software, FLOW 3D, desarrollado por la empresa Flow Science Inc. de Estados Unidos.

FLOW 3D es un programa de simulación de flujo basado en la resolución numérica por diferencias finitas de las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad. Consta también de varios módulos complementarios para la resolución de distintos problemas tales como el transporte de sedimentos, cuerpos sólidos en movimiento, escurrimiento en medios porosos, etc.

Para los problemas de flujos considerados incompresibles la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial}{\partial x} (uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (vA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (wA_z) + \xi \frac{uA_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad [1]$$

Cuando se está trabajando con el sistema de coordenadas cartesianas R es igual a la unidad y ξ es igual a cero. R_{SOR} contempla las fuentes de masa y A son las fracciones de áreas abiertas al flujo en las direcciones "x", "y" y "z".

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido son:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (-u_w - \delta u_s) \quad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y vu}{xV_F} = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (-v_w - \delta v_s) \quad [3]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (-w_w - \delta w_s) \quad [4]$$

En estas ecuaciones G son las aceleraciones de masa, f son las aceleraciones viscosas, b son las pérdidas en medios porosos y los últimos términos corresponden a fuentes de masa representadas por componentes geométricos.

Para la representación de la turbulencia hay cinco modelos disponibles: el modelo de longitud de mezcla de Prandtl, los modelos k-ε de una y dos ecuaciones, un modelo basado en los métodos RNG (Renormalization-Group) y un modelo de simulación de grandes vórtices (large eddy simulation, LES).

El espacio que se pretende modelar es discretizado mediante una malla de celdas cúbicas donde se aplican las ecuaciones mencionadas y se las resuelve numéricamente mediante dos métodos posibles: la sobre-relajación sucesiva (successive over-relaxation) y la alternación de la dirección especial (special alternating direction). FLOW-3D diferencia a la vez la fracción de cada celda que es sólido y la fracción que puede estar ocupada por fluido mediante el método FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method) y esto permite mejorar la definición de los contornos sólidos.

FLOW-3D ofrece la posibilidad de anidar mallas, esto es definir una malla dentro de otra y con una mayor densidad de celdas. De esta forma puede evaluarse en una misma corrida problemas de distintas escalas anidando, si es necesario, varias mallas una dentro de otras, obteniendo así la precisión requerida en cada caso. En cuanto a las condiciones de borde posibles en una malla se encuentran presiones, caudales, velocidades y niveles de agua, variables o no en el tiempo, entre otras.

CONSIDERACIONES GENERALES

En el desvío de ríos caudalosos, una de las mayores dificultades en la construcción de las obras temporarias es que resulta preciso avanzar con el cierre del río con flujo pasante (Figura 2). Esto se logra estrechando la sección de pasaje mediante el avance frontal de ataguías de materiales sueltos, donde es necesario conocer la velocidad y dirección del flujo de forma tal que pueda estimarse el tamaño de los bloques a depositar, tanto si se aceptará una pérdida de material, como si se pretende que los mismos no sean arrastrados por la corriente.

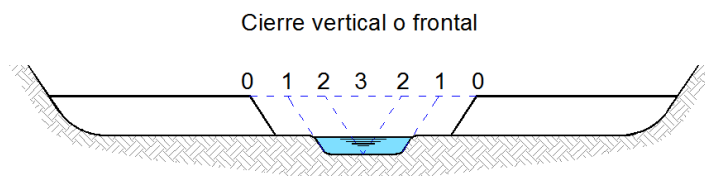


Figura 2.- Secuencia de cierre de río de tipo vertical o frontal

Las ataguías celulares o Cofferdam es otro tipo de estructuras utilizadas para formar recintos estancos de construcción. En grandes ríos suelen formar el recinto dentro del cual se construirán las obras de hormigón por donde circulará el caudal de desvío durante las fases siguientes. Es por ello importante conocer el campo de velocidades entorno a la zona donde se colocarán las ataguías metálicas que forman la ataguía celular (Figura 3).

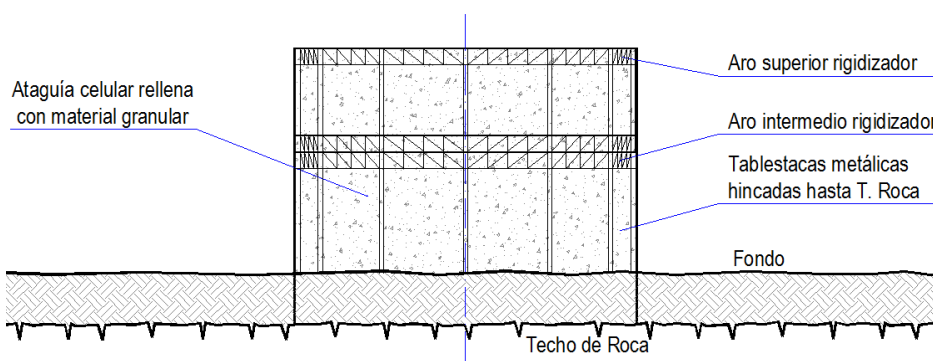


Figura 3.- Sección transversal del Cofferdam

SIMULACIÓN NUMÉRICA

En el caso de estudio presentado a continuación el plan de desvío del río comienza con el avance de una ataguía de materiales sueltos desde la margen izquierda del vertedero hasta alcanzar el cuenco disipador, a partir del cual se avanza con ataguías celulares metálicas que se cierran contra en el vano central del vertedero.

Como suele ocurrir en todas las obras de desvío no es posible interrumpir totalmente el flujo hacia aguas abajo de forma tal que la construcción se realice con aguas calmas, sino que se requiere dejar pasar un caudal mínimo, debido a requerimiento para la navegación, recreación, ambientales, etc. En nuestro caso es preciso mantener un caudal mínimo de $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ para sostener condiciones ambientales adecuadas en el brazo del río y por requerimientos para la navegación. De forma extraordinaria podrá erogarse un caudal menor equivalente a $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por los motivos expresados anteriormente el estudio de la obra de desvío presentado contempla 3 aspectos claves para la completa definición de las obras temporarias:

- Etapas constructivas.
- Esquemas de manejo de caudales de desvío.
- Métodos constructivos / Tipologías estructurales.

Se evaluaron dos etapas de construcción. En primer lugar, la etapa final del desvío que corresponde con el recinto de construcción completamente cerrado y luego la etapa intermedia con la ataguía de materiales sueltos finalizada, coincidente con el inicio de la construcción de la ataguía celular.

Dado que el esquema de manejo de caudales de desvío se realizará con el vertedero de la obra existente, es posible erogar el caudal con la combinación de vanos que mejor favorezca la construcción de las obras temporarias. En las modelaciones realizadas durante esta etapa se consideró al caudal entrante distribuido uniformemente en 1, 6 y 7 vanos.

Para la etapa con el recinto de construcción cerrado, se verificaron dos condiciones: una correspondiente con el caudal máximo de diseño del desvío distribuido en 4 vanos y la otra para la capacidad máxima de diseño de 8 vanos.

Las características principales de las modelaciones realizadas se resumen en la Tabla 1. En la Figura 3 (izquierda) se puede apreciar la disposición de los bloques de mallado correspondientes a esta etapa de estudio.

		MANEJO DE CAUDALES DE DESVÍO				
		VARIANTE 1	VARIANTE 2	VARIANTE 3	VERIFICACION 1	VERIFICACION 2
Etapas Constructivas		Final - Recinto de construcción cerrado				
Caudal (m³/s)		1.600	1.200	1.000	8.000	19.700
Vanos Abiertos		16	10 a 16	11 a 16	13 a 16	9 a 16
Condiciones de borde	Aguas arriba	NmáxN				NmáxE
	Aguas abajo	$N_R=f(Q_{\text{entrante}}) \rightarrow$ Ley de restitución				
Cantidad de mallas		4	5	5	3	3
Cantidad de celdas activas		993.687	2.443.281	2.442.724	1.987.756	1.956.583
Tamaño de celda	Mínimo (m)	1	0,3	0,6	1	1
	Máximo (m)	2	2	2,5	2	2
Relación de Mallas adyacentes (máx)		0,5				
Duración de simulación (seg)		320	530	145	279	150

Tabla 1.- Modelación numérica de variantes de erogación de caudales

Definida la combinación de apertura de compuertas del vertedero que no perjudique la construcción y ni la estabilidad de las obras temporarias, se analizaron 5 geometrías posibles para la ataguía de materiales sueltos. En la Figura 4 se puede apreciar la geometría actual de la pileta de aquietamiento y la secuencia de modificaciones realizadas a la ataguía de materiales sueltos.

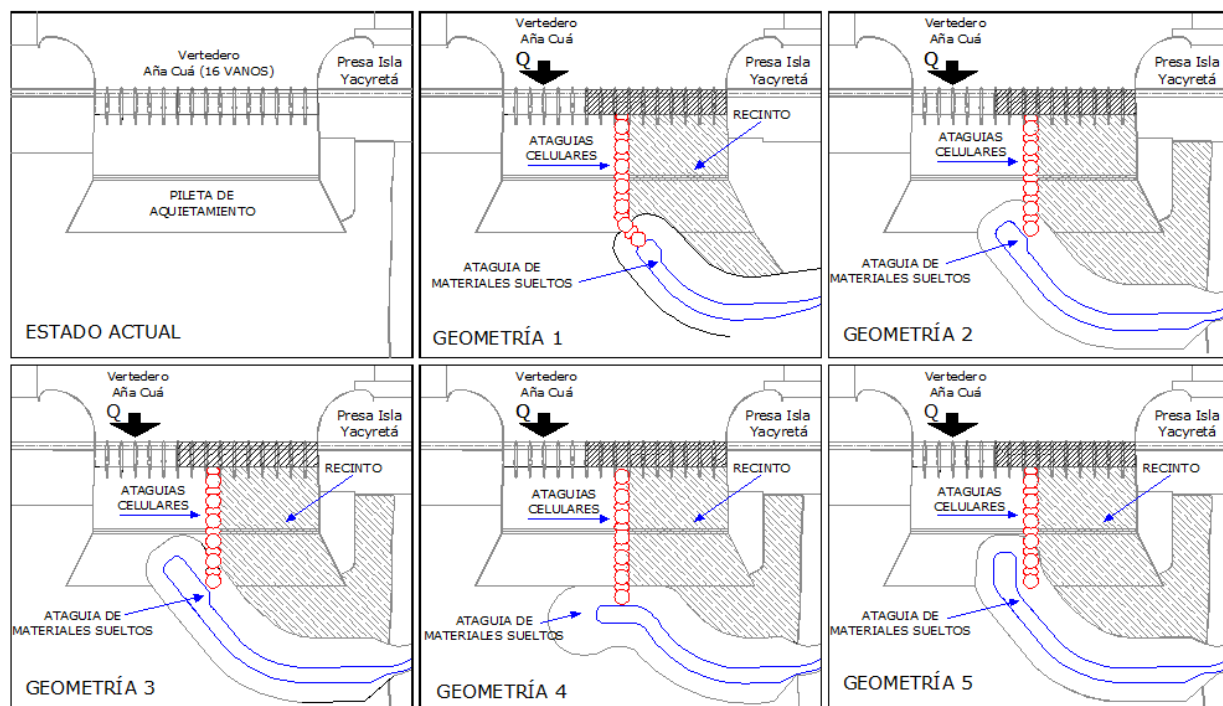


Figura 4.- Esquemas de la obra de desvío

Las características principales de las modelaciones de cada una de las geometrías analizadas se indican en la Tabla 2.

		B - MÉTODOS CONSTRUCTIVOS				
		GEOMETRÍA 1	GEOMETRÍA 2	GEOMETRÍA 3	GEOMETRÍA 4	GEOMETRÍA 5
Etapas Constructiva		Intermedia - Inicio de construcción del Coffe-Dam				
Caudal (m³/s)		1.000				
Vanos Abiertos		11 a 16				
Condiciones de borde	Aguas arriba	Qentrante				
	Aguas abajo	$N_R=f(Qentrante) \rightarrow$ Ley de restitución				
Cantidad de mallas		6				8
Cantidad de celdas		2.824.834	2.059.625	2.047.474	2.620.220	2.977.519
Tamaño de celda	Mínimo (m)	1	1,1	1,1	1	0,8
	Máximo (m)	2,5	2,2	2,2	2	2
Rel. Mallas adyacentes (máx)		0,5				
Duración de simulación (seg)		1.500	1.357	819	1.879	1.395

Tabla 2.- Modelación numérica de variantes geométricas de la obra complementaria de desvío

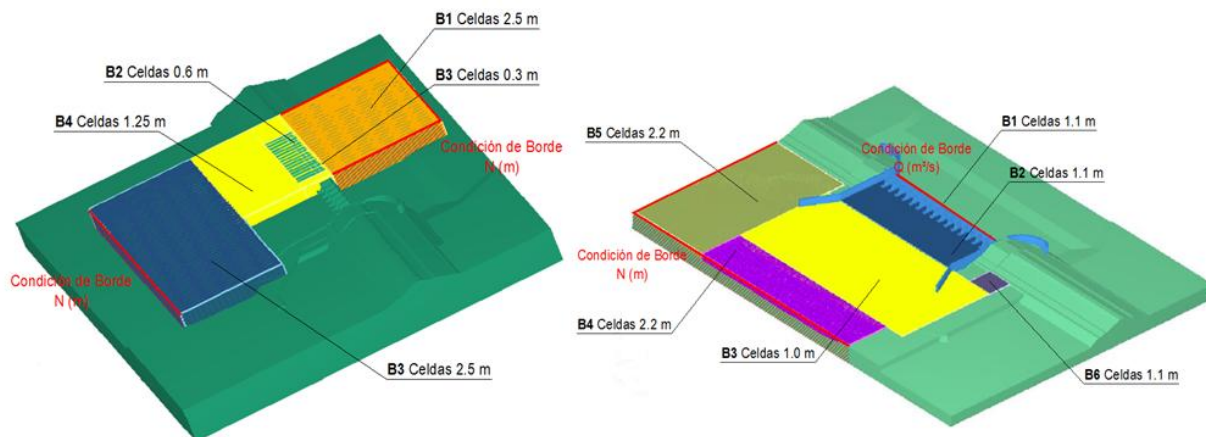
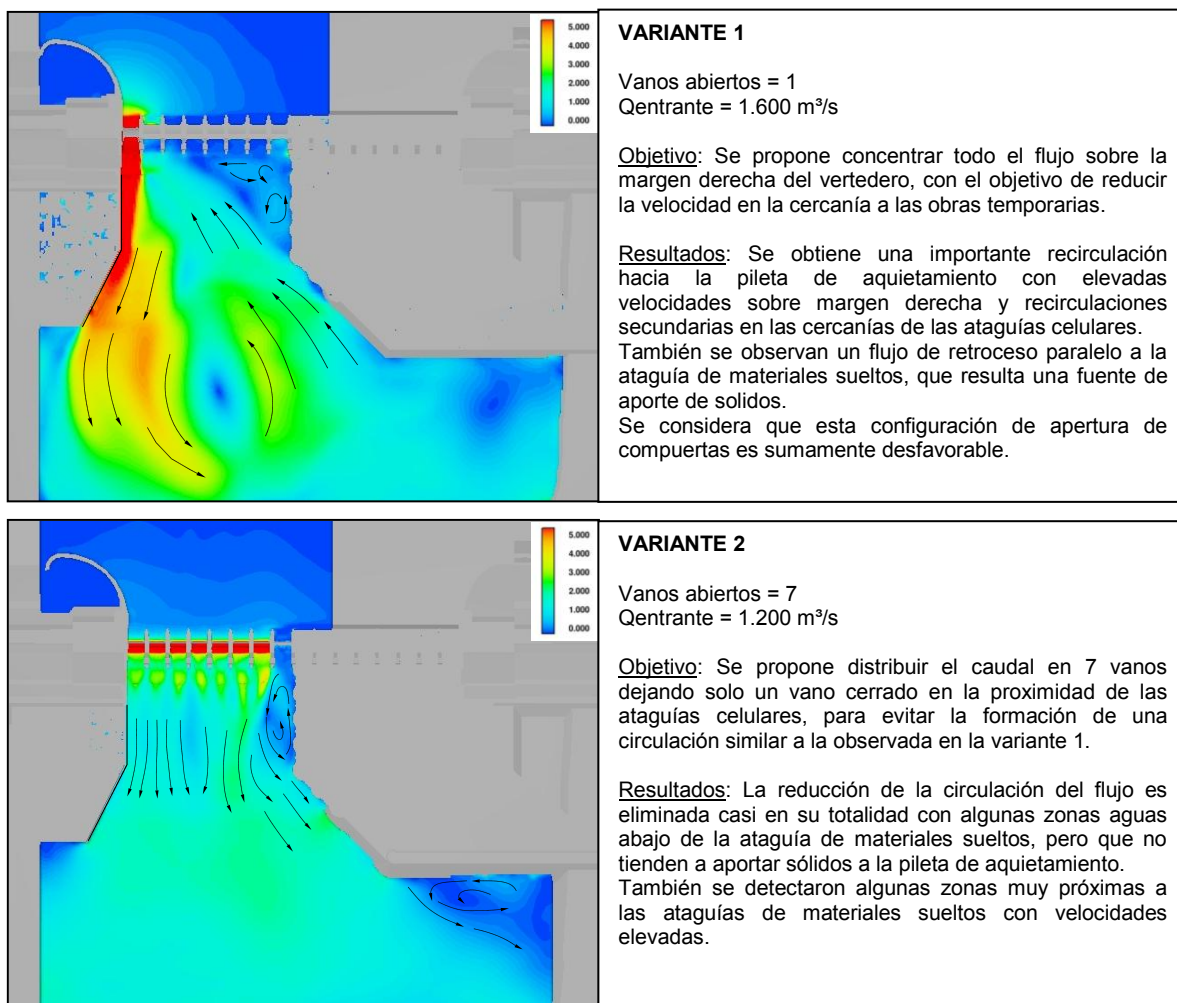
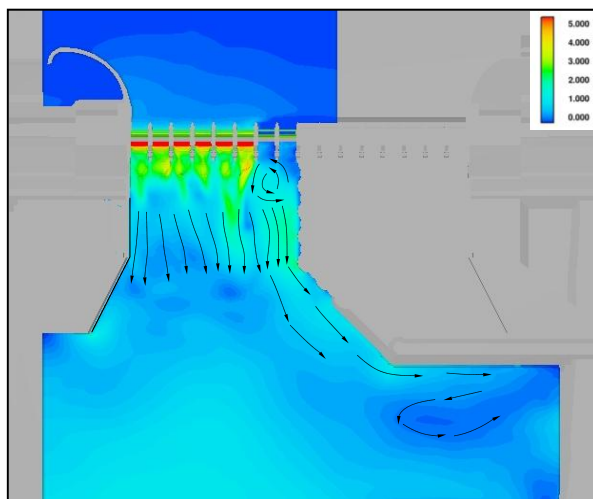


Figura 5.- Mallas utilizadas para el estudio de caudales de desvío (izquierda) y para las diferentes geometrías de la atagüa de materiales sueltos (derecha).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar la variante más conveniente respecto del manejo de caudales se observó el patrón de escurrimiento del flujo aguas abajo del vertedero. Principalmente interesa el comportamiento medio del flujo y la presencia de recirculación que tienda a introducir sólidos en la pileta de aquietamiento, la cual posee un diente de salida que favorece la retención de rocas dentro del mismo. La incorporación de sólidos en combinación con la presencia de un resalto hidráulico dentro del cuenco dissipador puede deteriorar seriamente la estructura de hormigón. Para el análisis de este aspecto se utilizó la visualización en planta de velocidad absoluta, y la promediada en la altura, así como también se utilizó el trazado de líneas de corriente y de vectores de velocidad.





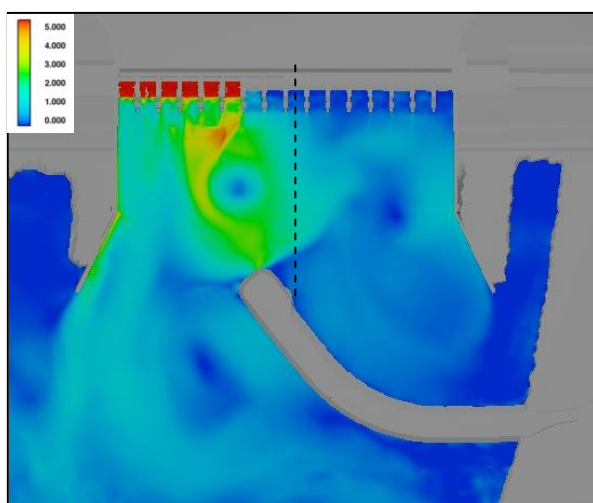
VARIANTE 3

Vanos abiertos = 6
Qentrante = 1.000 m³/s

Objetivo: Se distribuyó el caudal total entrante en 6 vanos con el objetivo de disminuir las velocidades en la cercanía de la ataguía celular y la de materiales sueltos.

Resultados: No se observa recirculación que tienda a introducir sólidos en la pileta de aquietamiento. Existen zonas de recirculación de baja velocidad dentro del cuenco y aguas abajo de la ataguía de materiales sueltos. Se logró disminuir las velocidades en la proximidad de ambas ataguías.

El estudio de la geometría en planta de la ataguía de materiales sueltos resulta de vital importancia ya que la misma tiene influencia sobre el patrón de flujo en la zona de inicio de construcción de las ataguías celulares y sobre el eje donde se extenderá la misma. Tanto para la colocación de la base de empotramiento de las tablestacas, de las estructuras de refuerzos, y la colocación de las tablestacas en sí mismas, las velocidades admisibles en la zona de trabajo no deberán superar 1,2 m/s. El criterio de comparación de las geometrías propuestas consiste en localizar la máxima velocidad en toda la profundidad del flujo en el área que ocupará la ataguía celular con especial atención de la zona de inicio de la misma.

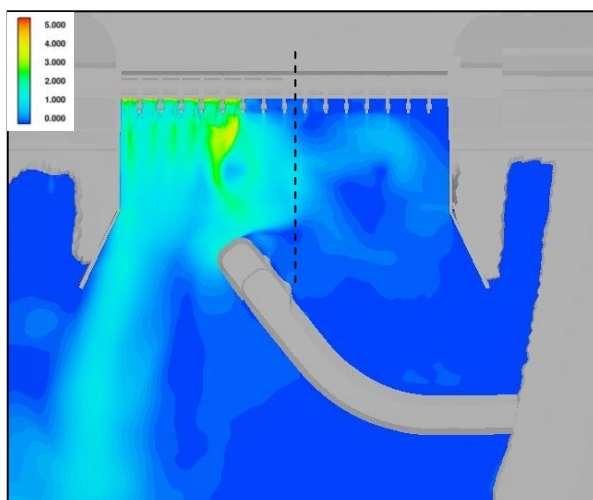


Geometría 2

Qentrante = 1.000 m³/s

Objetivo: Se eliminó el quiebre del eje de las ataguías celulares (geometría 1) donde se producía una concentración de velocidades de 3,6 m/s, valores por encima de los valores admisibles. El tramo de ataguía celular es reemplazado por la extensión de la ataguía de materiales sueltos.

Resultados: La velocidad máxima en área en torno al eje de la ataguía celular alcanza los 2,2 m/s. También se observa una gran circulación en el cuenco dissipador y aguas abajo del mismo en la vecindad de la ataguía de materiales sueltos, tendientes a introducir sólidos en el cuenco dissipador.

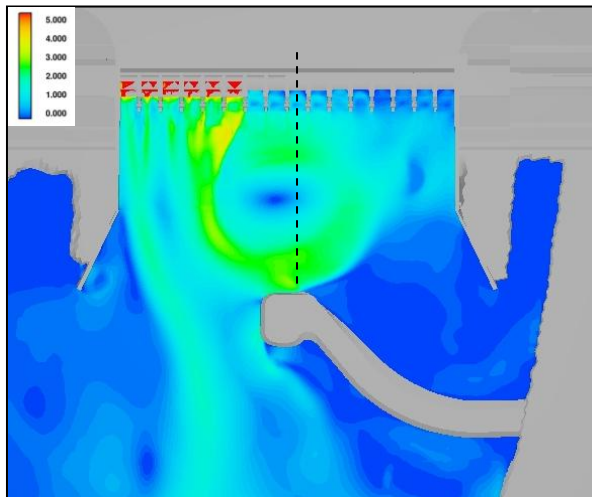


Geometría 3

Qentrante = 1.000 m³/s

Objetivo: Reducir la velocidad en el eje de la ataguía celular mediante la extensión de la ataguía de materiales sueltos generando una zona de "sombra" que permita reducir también las velocidades en el punto de inicio de la ataguía de materiales sueltos.

Resultados: La velocidad máxima en área en torno al eje de la ataguía celular alcanza los 1,20 m/s. La velocidad es aceptable y no se observa recirculación que introduzca sólidos en el cuenco dissipador.

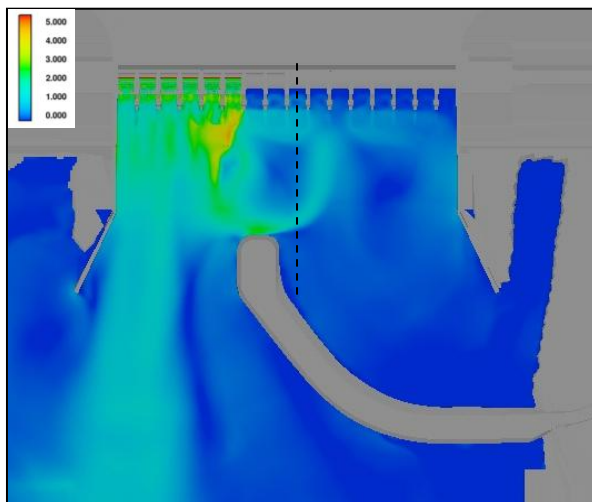


Geometría 4

Qentrante = 1.000 m³/s

Objetivo: Reducir el volumen de obra de materiales sueltos manteniendo bajas velocidades en el entorno del eje de la ataguía celular.

Resultados: La velocidad máxima en área en torno al eje de la ataguía celular alcanza los 3,0 m/s. Es evidente que el retroceso de la ataguía no resulta una opción válida desde el punto de vista de la reducción de velocidades en el eje de la ataguía celular. Tampoco es efectiva para controlar la circulación en el cuenco disipador.



Geometría 5

Qentrante = 1.000 m³/s

Objetivo: Partiendo de la geometría 3 (donde mejores resultados se han obtenido), se rota el extremo de la ataguía en dirección paralela al eje de la ataguía celular. El objetivo es reducir aún más la velocidad en la zona circundante a su eje.

Resultados: La velocidad máxima en área en torno al eje de la ataguía celular alcanza los 1,7 m/s. Esta alternativa no logra superar la alternativa 3.

Luego de este proceso de optimización de la ataguía de materiales sueltos, la geometría 3, resultó la opción más acorde a las necesidades requeridas en la construcción de la misma. Si bien la velocidad máxima en la zona de construcción de la ataguía celular es la máxima admitida, el criterio de evaluación es exigente ya que solo se evalúa la presencia de una única celda con dicha velocidad, y no un conjunto de celdas, resultando así del lado de la seguridad.

El campo de velocidad resultante de la modelación numérica, puede utilizarse para definir el tamaño medio del sólido a depositar en la ataguía de avance de forma tal que resulte estable y que permita su construcción en el tiempo esperado y sin la pérdida de material que podría quedar depositado aguas abajo del cuenco disipador.

CONCLUSIONES

La herramienta numérica resulta ser muy potente en el estudio del desvío del río, principalmente porque no requiere de grandes instalaciones de ensayo. Además permite: conocer el campo de velocidades en toda la extensión y profundidad del escurrimiento, detectar fácilmente los puntos con velocidades mayores a las admisibles y visualizar fácilmente el patrón de escurrimiento.

Otra característica que es muy importante en el análisis de los resultados, a diferencia del estudio en modelos físicos, es que puede suceder que en una determinada condición de ensayo se observaron solo algunos aspectos, pero en corridas sucesivas se adicionaron otros a los que no se prestó debida atención anteriormente. En estos casos solo basta con revisar las corridas de modelo y procesar los resultados nuevamente. En el caso de modelos físicos ello requeriría la reconstrucción de las geometrías modeladas, la repetición del ensayo y mediciones de los parámetros deseados.

La siguiente etapa de proyecto de la obra de desvío, requiere el ensayo sobre modelo físico para la verificación de la geometría optimizada en modelo físico. Esta primera etapa permitió una mejor aproximación a la solución más adecuada y una más precisa evaluación del costo y tiempo que demandará la construcción. Además, luego de validar los resultados de la modelación matemática, ésta podrá complementar información que puede resultar muy difícil y/o imposible de relevar en modelo físico.

Si bien se trata de un desvío “atípico” del río, sus conclusiones y recomendaciones pueden hacerse extensivas a otros casos más generales.

BIBLIOGRAFÍA

Liscia, S.O., Angulo, M.A. y Lugo, M.V. (2010). “Modelación física y matemática de una obra de derivación”. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay.

Liscia, S.O., Angulo, M.A., de Dios, M y del Blanco, M.M. (2010). “Modelación matemática y física de un vertedero modificado”. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay.

Vallarino, E. (1998). *Tratado Básico de Presas Tomo II: Aliviaderos. Construcción y Explotación de Presas*. Servicio de Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid. Madrid. España.

Sorensen, D. (1969). *Handbook of Applied Hydraulics Third Edition*. McGraw-Hill. Tokyo. Japan.